



Pemanfaatan *Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR) Untuk Mengidentifikasi Laju Deformasi Permukaan di Lapangan Panas Bumi Ulubelu

(Utilization of Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) to Identify Surface Deformation Rate in Ulubelu Geothermal Field)

I Gede Boy Darmawan, Karyanto

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

Penulis Korespondensi: I Gede Boy Darmawan | **Email:** igedeboy@staff.unila.ac.id

Diterima (*Received*): 22/06/2021 Direvisi (*Revised*): 13/11/2021 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 08/12/2021

ABSTRAK

Lapangan panas bumi Ulubelu telah diekstraksi sejak tahun 2012 dengan menghasilkan 2 x 55 MW dari PLTP unit 1 & 2 dan meningkat menjadi 4 x 55 MW sejak tahun 2016 dengan beroperasinya unit 3 dan unit 4. Peningkatan eksploitasi energi panas bumi di Ulubelu berpotensi menimbulkan perubahan kondisi geologi dan lingkungan yang salah satunya adalah subsiden. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi laju deformasi permukaan memanfaatkan metode *Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR) di lapangan panas bumi Ulubelu. Sebanyak 49 data Sentinel-1 periode Oktober 2014 hingga Maret 2020 dengan mode *descending* telah diolah dan dianalisis menggunakan tiga *software* utama yaitu SNAP, StaMPS dan *StaMPS-Visualizer*. Pembentukan interferogram pada setiap pasangan data (*image pair*) antara *master* dengan seluruh *slave* dilakukan menggunakan SNAP. Seluruh data interferogram kemudian di *export* sebagai input data StaMPS untuk mendapatkan nilai piksel yang memiliki koherensi terbaik dan *persistent*. Hasil pengolahan menunjukkan laju deformasi per titik *persistent scatterer* (PS) berkisar antara -7,3 hingga +7,5 mm/tahun relatif pada arah *Line of Sight* (LOS) tanpa validasi lapangan. Pola deformasi berupa penurunan muka tanah berada di sekitar area eksploitasi panas bumi, sedangkan kenaikan muka tanah (*uplift*) terdeteksi di luar area eksploitasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kesamaan laju deformasi pada PLTP unit 1 & 2 dengan PLTP unit 3 & 4 mengindikasikan proses subsiden di area Ulubelu didominasi oleh proses ekstraksi fluida panas bumi. Temuan ini juga memperkuat penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa proses subsiden di area panas bumi Ulubelu disebabkan oleh pemadatan batuan alterasi.

Kata Kunci: Deformasi, Panas bumi, PSInSAR, Subsiden, Ulubelu

ABSTRACT

Ulubelu geothermal field has been extracted since 2012 by producing 2 x 55 MW from PLTP units 1 & 2 and increased to 4 x 55 MW since 2016 with the operation of unit 3 and unit 4. Increased exploitation of geothermal energy in Ulubelu can cause changes in geological and environmental conditions, one of which is subsidence. This study aims to identify the potential surface deformation rate using the Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) method in the Ulubelu geothermal field. A total of 49 Sentinel-1 data from October 2014 to March 2020 in descending mode have been processed and analyzed using three main software, namely SNAP, StaMPS, and StaMPS-Visualizer. The interferogram formation on each data pair between the master and all slaves is done using SNAP. All interferogram data is then exported as StaMPS data input to obtain pixel values that have the best and persistent coherence. The processing results show that the deformation rate per point of the persistent scatterer (PS) ranges from -7.3 to +7.5 mm/year relative to the Line of Sight (LOS) direction without field validation. The deformation pattern in land subsidence is around the geothermal exploitation area, while the uplift is detected outside the exploitation area. The analysis results show that the similarity of the deformation rate at PLTP units 1 & 2 and PLTP units 3 & 4 indicates that the geothermal fluid extraction process dominates the subsidence process in the Ulubelu area. This finding also strengthens previous research, which showed that the compaction of alteration rocks caused the subsidence process in the Ulubelu geothermal area.

Keywords: Deformation, Geothermal, PSInSAR, Subsidence, Ulubelu

1. Pendahuluan

Pemanfaatan sumber energi panas bumi yang meningkat disertai dengan eksploitasi yang besar dan jangka waktu yang lama memang membawa manfaat yang besar bagi terpenuhinya ketahanan energi nasional (Ashat & Ardiasyah, 2012; Harsopravitno, 2009) serta membuka jutaan lapangan pekerjaan, bahkan lebih banyak dari sistem pembangkit listrik lainnya. Namun kegiatan eksploitasi di lapangan panas bumi tersebut dapat menimbulkan beberapa perubahan pada kondisi geologi dan lingkungan yang salah satunya adalah subsiden (White dkk., 2005).

Penurunan muka tanah/subsiden di lapangan panas bumi akibat eksploitasi telah banyak didokumentasikan (Eysteinnsson, 2000; Mossop & Segall, 1997; White dkk., 2005). Keadaan tersebut disebabkan oleh penurunan tekanan dalam reservoir panas bumi (pada kasus lapangan panas bumi Wairakei, New Zealand sebesar -25 bar dengan total subsiden sampai 15 meter pada tahun 2001) (White dkk., 2005). Selain berdampak pada penurunan kuantitas energi listrik, subsiden juga dapat merusak jalur pipa, sumur dan drainase, jalur transmisi listrik, bahkan bangunan dan jalan serta merusak level muka air yang berdampak pada lingkungan dan masyarakat di sekitarnya (Bloomer & Currie, 2001; White dkk., 2005).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode monitoring telah dilakukan agar perubahan yang terjadi pada sistem panas bumi dapat segera diketahui dan dilakukan upaya mitigasinya. Salah satu metode geofisika yang telah banyak digunakan untuk monitoring tersebut adalah metode 4D *microgravity*. Metode ini mampu mendeteksi dinamika fluida di dalam sistem panas bumi (Santoso dkk., 2004; Sarkowi, 2013; Sarkowi dkk., 2005). Metode *ground survey* lainnya adalah GPS geodetik yang digunakan untuk mendeteksi deformasi yang terjadi berdasarkan titik datum/*benchmark* secara berkala. Namun kedua metode ini membutuhkan waktu pengukuran yang lama dan membutuhkan biaya yang cukup besar, sehingga hanya berfokus pada area potensi panas bumi saja.

Perkembangan teknologi citra satelit yang sangat pesat dewasa ini telah memberikan kesempatan bagi peneliti untuk memanfaatkan data-data tersebut dalam memonitoring suatu lapangan panas bumi. *Interferometric Synthetic Aperture Radar* atau InSAR merupakan metode yang memanfaatkan citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR), memiliki kapabilitas yang sangat baik dalam mendeteksi dan mengukur *ground deformation* dengan tingkat akurasi dalam milimeter dan cakupan spasial yang luas (Das dkk., 2015; Esfahany, 2008; Ferretti dkk., 2007; Zaenudin dkk., 2018). Dibandingkan dengan metode *ground survey*, InSAR dapat dilakukan tanpa harus mendatangi *remote area* (Agustan, 2010). Metode InSAR berkembang menjadi metode *persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar* (PSInSAR). Metode ini mampu mengidentifikasi dan mengukur deformasi tanah, pengamatan *ground subsidence*, pengamatan terhadap aktivitas vulkanik, analisis dan rekonstruksi deformasi pasca gempa, mengidentifikasi

manifestasi permukaan geothermal, monitoring potensi longsor dan deformasi permukaan pada lapangan minyak (Akbari & Saepuloh, 2016; Dai dkk., 2016; Jo dkk., 2017; Junisbekova dkk., 2016; Lesko dkk., 2018; Razi dkk., 2018; Stephens dkk., 2017; Zhantayev dkk., 2014).

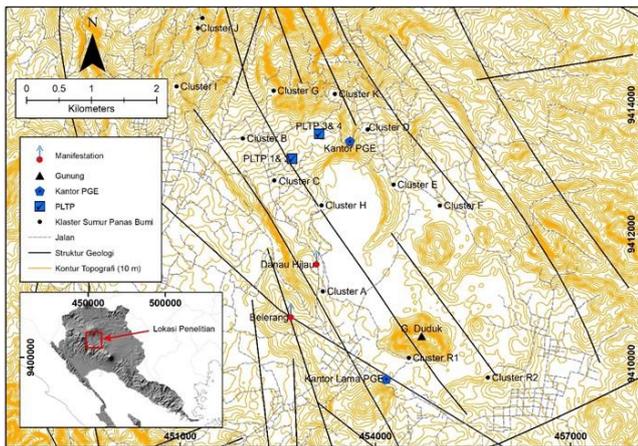
Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan citra SAR untuk mengukur laju perubahan permukaan tanah di area panas bumi Ulubelu menggunakan teknik PSInSAR. Penelitian ini bermaksud untuk melengkapi penelitian sebelumnya yang berhasil mengidentifikasi adanya subsiden sebesar 3,3 mm/tahun di Ulubelu berdasarkan InSAR (Zaenudin dkk., 2020). Namun penelitian tersebut hanya menggunakan 19 *scene* dengan rentang tahun 2017 hingga 2018. Kondisi tersebut belum dapat menggambarkan deformasi pada proses ekstraksi fluida geothermal dari PLTP unit 1 & 2 yang beroperasi sejak tahun 2012. Oleh karena itu, penelitian ini melengkapi data dari tahun 2014 hingga 2020 sebanyak 49 *scene*. Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan teknik PSInSAR yang mampu meningkatkan akurasi karena hanya memilih titik yang persisten nilai koherensinya. Meskipun tanpa proses verifikasi langsung di lapangan, namun pengukuran laju deformasi dengan metode PSInSAR ini dapat menjadi salah satu solusi cepat dalam tahap monitoring di lapangan produksi panas bumi Ulubelu. Keunggulan metode ini adalah mampu mengukur laju perubahan muka tanah secara simultan atau runtut waktu, sehingga setiap perubahan muka tanah selama proses produksi di lapangan panas bumi Ulubelu dapat dideteksi.

2. Data dan Metodologi

Lokasi penelitian ini terletak di area lapangan panas bumi Ulubelu, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Metode penelitian difokuskan pada metode PSInSAR dan hanya menggunakan data SAR tanpa verifikasi lapangan. Hal ini dilakukan karena penelitian ini hanya berfokus pada pemanfaatan PSInSAR dalam proses identifikasi awal adanya laju deformasi akibat kegiatan ekstraksi fluida panas bumi di Ulubelu. Penelitian ini juga memanfaatkan hasil penelitian sebelumnya (oleh Zaenudin dkk., 2020) sebagai referensi pembandingan untuk hasil PSInSAR. Berikut ini adalah rincian data dan metode yang digunakan dalam penelitian ini.

2.1. Data dan Lokasi

Lapangan panas bumi Ulubelu merupakan bagian dari sistem panas bumi yang terdiri dari Rendingan-Ulubelu-Way Panas (RUW) (Husein dkk., 2015; Suharno, 2013; Suharno & Danusaputro, 2005) berjarak sekitar 15 Km dari bagian selatan Sistem Sesar Sumatera, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Sejak tahun 2012, lapangan panas bumi Ulubelu telah berkontribusi dengan menghasilkan 2 x 55 MW (Giriarto dkk., 2015; Mulyanto dkk., 2015; Yuniar dkk., 2015) dari unit 1 dan 2 serta pada tahun 2016 mulai mengoperasikan unit 3 dan unit 4 pada tahun 2017 dengan kapasitas tambahan sebesar 2 x 55 MW (Mubarok & Zarrouk, 2016; Siahaan dkk., 2015; Zakaria, 2019) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi lapangan panas bumi Ulubelu, Lampung

Penelitian ini menggunakan 49 data Sentinel-1 yang diakuisisi oleh satelit milik *European Space Agency* (ESA) dari bulan Oktober 2014 hingga Maret 2020. Dataset ini memiliki waktu repetisi rata-rata antara 30 hari hingga 60 hari, kecuali dataset tahun 2015 hanya terdiri dari 5 *scene* sesuai dengan sumber ketersediaan dataset di *Alaska Satellite Facility* (ASF), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dataset ini diperoleh dalam format *Single Look Complex* (SLC) dengan mode *swath Interferometric Wide* (IW). Spasi piksel berkisar antara 5 – 20 meter dalam komponen *azimuth* dan *range*. Seluruh data diperoleh dengan bebas melalui akses *Alaska Satellite Facility* (ASF) dengan geometri sensor dalam orbit *Descending* dan *incidence angle* sekitar 34 derajat.

Tabel 1 Karakteristik data Sentinel-1 yang digunakan dalam PSInSAR

Waktu Akuisisi	Orbit	Jumlah Scene	Status
14-03-2018	<i>Descending</i>	1	<i>Master</i>
13-10-2014 - 24-12-2014	<i>Descending</i>	3	<i>Slave</i>
10-02-2015 - 25-11-2015	<i>Descending</i>	5	<i>Slave</i>
12-01-2016 - 19-11-2016	<i>Descending</i>	7	<i>Slave</i>
06-01-2017 - 10-08-2017	<i>Descending</i>	9	<i>Slave</i>
01-01-2018 - 15-12-2018	<i>Descending</i>	11	<i>Slave</i>
08-01-2019 - 10-12-2018	<i>Descending</i>	11	<i>Slave</i>
15-01-2020 - 03-03-2020	<i>Descending</i>	2	<i>Slave</i>

Proses *subset* dilakukan untuk memfokuskan area pengolahan data pada lapangan panas bumi Ulubelu dengan menerapkan teknik *S-1 TOPS Split*. Seluruh data Sentinel-1 yang digunakan telah di-*split* pada posisi *subswath* IW2 dengan polarisasi *vertical to vertical* (VV) dan posisi 3 to 4 pada *burst*. Proses ini dilakukan untuk mengurangi jumlah data yang akan diolah dengan menggunakan teknik PSInSAR. Sehingga dalam pengolahan,

hanya data di area penelitian yang diproses. Selain meringankan jumlah memori yang terpakai, proses ini juga mempercepat waktu pengolahan data.

2.2. Metode PSInSAR

Pengolahan citra SAR dengan metode PSInSAR bertujuan untuk mengidentifikasi pergerakan atau pergeseran permukaan pada area koheren rendah berbasis piksel (*single coherent pixels*) yang berada pada *baseline* yang besar secara *time series*. Metode ini berkembang dari teknik InSAR dan *Differential InSAR* (DInSAR). Kekurangan akibat temporal *decorrelation* dan adanya efek *atmospheric dishomogeneities* menyebabkan hasil *interferogram* kurang baik, sehingga teknik *persistent scatterer* dikembangkan untuk menghilangkan efek tersebut. Teknik ini juga mampu meningkatkan akurasi hingga milimeter per tahun dalam pengukuran laju deformasi permukaan dan menawarkan area *coverage* yang luas serta dapat digunakan untuk mengukur deformasi di masa lampau (Crosetto dkk., 2016; Sudiana dkk., 2014).

Perbedaan fase dalam pengukuran deformasi permukaan dipengaruhi oleh beberapa komponen antara lain deformasi, orbit, topografi, atmosferik dan *noise* seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 1 (Crosetto dkk., 2016; Darmawan dkk., 2021) di bawah ini.

$$\Delta\varphi_{DInSAR} = \varphi_{defo} + \Delta\varphi_{orbit} + \varphi_{res_topo} + \Delta\varphi_{atm} + \varphi_{noise} + 2k\pi \quad (1)$$

Dimana $\Delta\varphi_{DInSAR}$ adalah nilai fase deformasi total (DInSAR), φ_{res_topo} merupakan fase residual *error* topografi, sedangkan untuk $\Delta\varphi_{atm}$ dan $\Delta\varphi_{orbit}$ merupakan perbedaan nilai fase *error* antara citra *master* dan *slave* yang disebabkan oleh pengaruh atmosfer dan orbit. Terakhir untuk φ_{Noise} dan k adalah nilai untuk fase *noise* dan fase ambiguitas bernilai bilangan bulat. Untuk memperoleh nilai fase deformasi permukaan (φ_{defo}) maka diperlukan beberapa tahapan proses koreksi pada fase-fase *error* tersebut (Crosetto dkk., 2016).

2.3. Tahapan Pengolahan Data

Proses pengolahan data pada penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama yaitu persiapan data InSAR dengan menggunakan *software* SNAP. Pada tahapan ini, koreksi orbit dilakukan pada seluruh dataset, kemudian dilakukan proses *coregistration* dengan *master* menggunakan data akuisisi pada 14 Maret 2018. Master data ini dipilih berdasarkan nilai *perpendicular* dan *temporal baseline* paling optimal seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Dataset InSAR yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai *temporal baseline* (-720 hingga 1248 hari) dan *perpendicular baseline* (-114,84 hingga 99,95 meter) terhadap data Master.

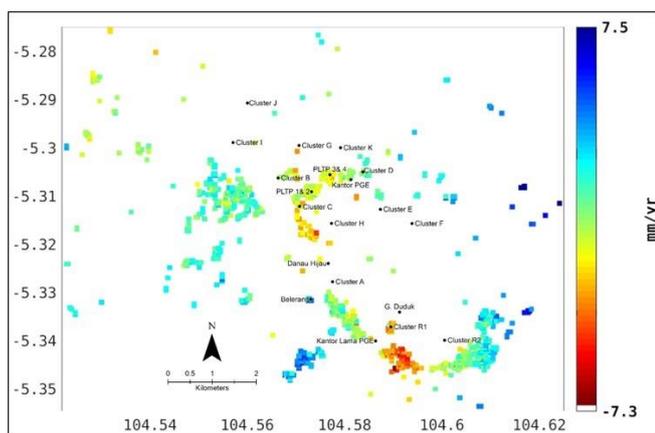
Proses pembentukan *interferogram* dilakukan untuk mendapatkan perbedaan nilai fase pada setiap pasangan data (*image pair*) antara *master* dengan seluruh *slave*. Proses ini akan menghasilkan pola *fringes* pada daerah yang mengalami deformasi relatif terhadap *Line of Sight* (LOS). Untuk mendeteksi laju perubahan permukaan tanah pada periode yang panjang, secara umum teknik InSAR

deformasi negatif/menjauh dari sensor dan warna biru untuk deformasi positif/mendekat ke sensor (Gambar 4).



Gambar 4. Seluruh interferogram hasil pengolahan data PSInSAR

Berdasarkan pola perubahan simbol warna pada interferogram tanggal 13 Oktober 2014 terhadap *master* interferogram, nampak warna kuning hingga merah mendominasi area bagian tengah dan menerus ke bagian tenggara daerah penelitian yang diketahui sebagai area aktivitas ekstraksi fluida panas bumi Ulubelu. Warna ini mengindikasikan adanya perbedaan jarak berdasarkan beda fase yang bernilai negatif antara data *slave* dengan *master* relatif terhadap arah LOS. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai adanya penambahan jarak sensor dengan permukaan tanah antara pengukuran tanggal 13 Oktober 2014 dengan pengukuran tanggal 14 Maret 2018 atau jarak *slave* lebih dekat dari *master*. Penambahan jarak ini dapat disebabkan oleh adanya pergerakan muka tanah seperti subsiden, erosi dan longsor pada perbukitan, maupun aktivitas manusia. Namun untuk aktivitas manusia, perubahan muka tanah terjadi secara signifikan sehingga akan terkoreksi oleh nilai koherensi yang rendah.



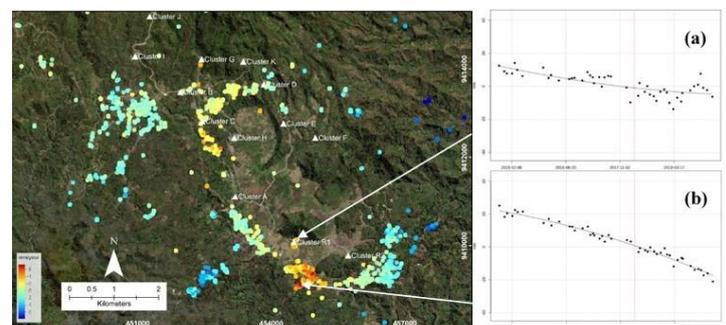
Gambar 5. Peta laju deformasi rata-rata (mm/tahun) di area panas bumi Ulubelu

Perubahan pola warna secara konsisten dan menerus yang ditunjukkan pada Gambar 4 mengindikasikan bahwa

pola deformasi terjadi secara perlahan dan menerus. Jika diperhatikan pada bagian selatan daerah penelitian, perubahan gradasi warna merah hingga biru mengindikasikan adanya penambahan jarak secara konsisten terhadap *master* interferogram. Untuk mengetahui total rata-rata laju perubahan muka tanah/deformasi di daerah penelitian, maka seluruh perubahan pada 48 interferogram dihitung berdasarkan laju deformasi per tahun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

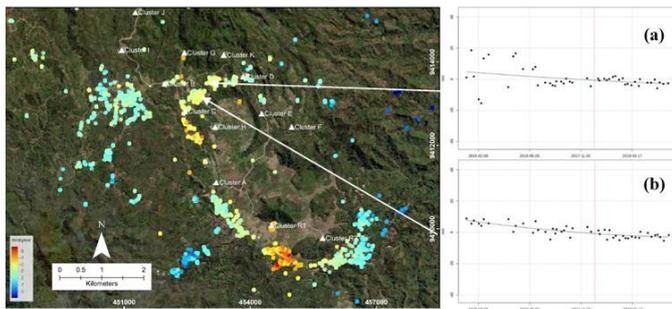
Berdasarkan peta sebaran laju deformasi rata-rata tiap PS di area panas bumi Ulubelu memiliki rentang nilai -7,3 hingga +7,5 mm/tahun. Meskipun nilai laju deformasi ini cukup bervariasi di setiap PS, namun pola sebaran yang terkluster di wilayah kerja panas bumi dapat mengindikasikan adanya hubungan laju deformasi berupa penurunan muka tanah/subsiden dengan aktivitas ekstraksi fluida panas bumi di wilayah tersebut. Indikasi ini masih sulit untuk dibuktikan secara langsung tanpa adanya data lapangan atau pendukung lainnya. Analisis lokasi yang mengalami deformasi juga masih cukup sulit dilakukan jika hanya menggunakan peta hasil pengolahan dari StaMPS. Oleh karena itu, data laju deformasi ini akan dianalisis menggunakan perangkat *StaMPS-Visualizer*.

Data sebaran laju deformasi rata-rata/tahun diexport ke dalam tabel yang kemudian diinput ke dalam sistem *StaMPS-Visualizer*. Seluruh data PS dapat ditampilkan dalam peta citra satelit secara langsung di daerah penelitian. Laju deformasi tiap PS dapat ditampilkan dalam kurva seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6 di bawah ini. Lokasi PS pada Gambar 6 (a) berada di kaki Gunung Duduk yang merupakan area sumur produksi yang saat ini telah difungsikan sebagai sumur injeksi dengan kode klaster R1.



Gambar 6. Peta dan kurva laju deformasi di area Gunung Duduk (a) dan Pekon Gunung Tiga (b) lapangan panas bumi Ulubelu. Lokasi titik PS ditunjukkan oleh panah berwarna putih pada gambar.

Pola laju deformasi berupa penurunan muka tanah kumulatif PS mencapai ± 20 mm dari tahun 2014 hingga 2019 yang kemudian membentuk pola *uplift*, namun kemudian kembali mengalami subsiden hingga 2020. Pola *uplift* dapat mengindikasikan dampak dari kegiatan injeksi di wilayah ini, namun tetap diperlukan data pengukuran lainnya sebagai pembanding, mengingat hasil ini merupakan deformasi relatif terhadap arah LOS.

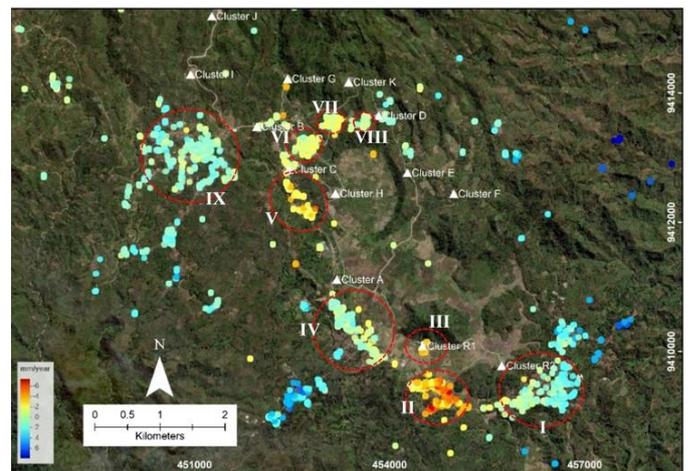


Gambar 7. Peta dan kurva laju deformasi di area PLTP unit 3 & 4 (a) dan PLTP unit 1 & 2 (b) lapangan panas bumi Ulubelu. Lokasi titik PS ditunjukkan oleh panah berwarna putih pada gambar.

Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh Gambar 6(b) yang berlokasi di Pekon/Desa Gunung Tiga. Daerah ini berada di antara klaster R1 dan R2, yang merupakan klaster untuk sumur injeksi yang baru beroperasi beberapa tahun terakhir. Namun salah satu titik PS menunjukkan bahwa laju penurunan muka tanah/subsiden di area ini cukup konsisten dan terakumulasi mencapai ± 40 mm. Pola deformasi tiap data pengukuran juga tidak tersebar sehingga menunjukkan bahwa titik PS memiliki koherensi yang sangat baik. Kondisi ini dapat diinterpretasikan bahwa titik PS ini merupakan titik deformasi yang disebabkan oleh pergerakan yang lambat dan konsisten (mengindikasikan subsiden).

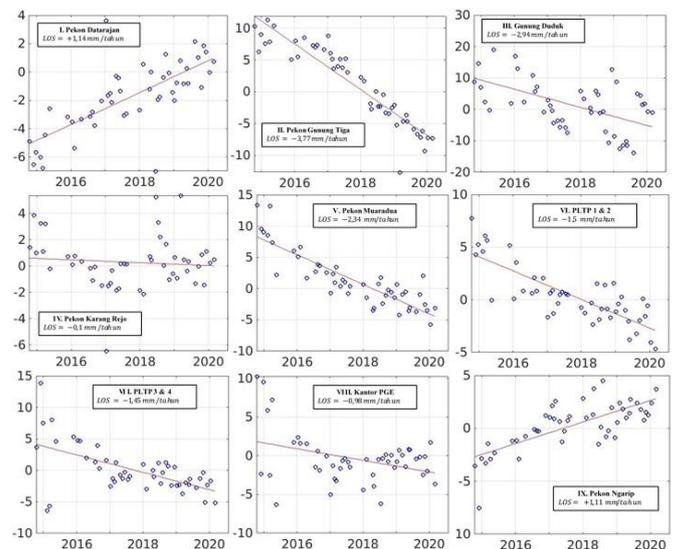
Sebaran laju deformasi rata-rata/tahun tiap PS di daerah PLTP unit 1 & 2 serta PLTP unit 3 & 4 juga menunjukkan pola deformasi negatif sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 7. Kurva deformasi pada area PLTP unit 1 & 2 (Gambar 7(b)) yang telah beroperasi sejak tahun 2012 (Yuniar dkk., 2015) juga menunjukkan penurunan namun tidak signifikan yaitu ± 12 mm relatif terhadap LOS. Nilai ini relatif kecil mengingat fasilitas ini dimonitoring dan dirawat dengan baik karena merupakan salah satu objek vital negara. Sementara itu, untuk kurva deformasi pada area PLTP unit 3 & 4 menunjukkan pola yang tersebar hingga pertengahan tahun 2016 dan kemudian mulai terfokus di tahun 2017. Hal ini dikarenakan PLTP unit 3 & 4 baru mulai beroperasi pertengahan tahun 2016 (Cahyono, 2017; Siahaan dkk., 2015) sehingga area PS tersebut sebelum tahun 2016 masih dalam tahap konstruksi. Meskipun nilai deformasi relatif kecil, namun *trend* deformasi berupa penurunan muka tanah/subsiden cukup dominan di sekitar area ini. Kondisi ini akan selalu menjadi salah satu faktor penting dalam kegiatan monitoring di area panas bumi Ulubelu.

Untuk mengetahui besar laju penurunan muka tanah rata-rata di beberapa area terkonsentrasinya titik PS, maka perhitungan dilakukan kembali dengan menggunakan StaMPS. Adapun area yang dipilih untuk melihat laju deformasi penurunan muka tanah sebanyak 9 lokasi yang berisiko akan terdampak karena berada di area penduduk dan fasilitas vital negara seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Area analisis kurva laju deformasi LOS di area panas bumi Ulubelu

Berdasarkan hasil plot kurva laju deformasi LOS rata-rata pada masing-masing area yang ditunjukkan pada Gambar 8, diperoleh dua pola deformasi di area panas bumi Ulubelu. Deformasi positif atau kenaikan muka tanah (*uplift*) relatif terhadap LOS berada di Pekon Datarajan (I) dan Pekon Ngarip (IX). Daerah ini berada di batas luar sumur panas bumi yaitu di batas tenggara dan di batas barat laut. Besarnya kenaikan muka tanah rata-rata berkisar $+1,11$ mm/tahun di Pekon Ngarip hingga $+1,14$ mm/tahun di Pekon Datarajan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Temuan ini menjadi indikasi pengaruh perubahan konsentrasi fluida bawah permukaan yang diekstraksi pada area sumur panas bumi dengan wilayah sekitarnya. Selain itu, wilayah tenggara lapangan panas bumi Ulubelu merupakan zona sumur injeksi khususnya klaster R2 yang berada di wilayah Pekon Datarajan.



Gambar 9. Kurva laju deformasi LOS tiap area vital di wilayah panas bumi Ulubelu

Selanjutnya untuk area penduduk di sekitar sumur panas bumi seluruhnya mengalami deformasi negatif atau penurunan muka tanah (subsiden) relatif terhadap LOS. Berdasarkan kurva laju deformasi LOS pada Gambar 7,

daerah dengan penurunan muka tanah tertinggi secara rata-rata berada di area Pekon Gunung Tiga (II) dengan penurunan -3,77 mm/tahun, disusul oleh klaster R1 di area Gunung Duduk (III) sebesar -2,94 mm/tahun dan Pekon Muaradua (V) sebesar -2,34 mm/tahun. Laju deformasi ini selaras dengan hasil penelitian sebelumnya yang menemukan bahwa rata-rata laju deformasi Ulubelu pada periode 2017-2018 sebesar -3,3 mm/tahun (Zaenudin dkk., 2020). Hasil ini menunjukkan bahwa hingga tahun 2020, laju penurunan muka tanah di area panas bumi Ulubelu masih terus berlanjut dengan laju berkisar -3 mm/tahun.

Deformasi di area vital negara seperti PLTP unit 1 & 2 (VI) dan PLTP unit 3 & 4 (VII) juga terdeteksi sebagai penurunan muka tanah masing-masing -1,5 mm/tahun dan -1,45 mm/tahun. Temuan yang menarik pada deformasi ini adalah laju deformasi di kedua area PLTP ini hingga tahun 2020 menunjukkan nilai yang relatif sama meskipun PLTP unit 3 & 4 baru mulai dibangun dan beroperasi sejak pertengahan 2016 (Zakaria, 2019) atau 4 tahun setelah PLTP unit 1 & 2. Kondisi ini mencerminkan bahwa proses deformasi yang terjadi di area ini didominasi oleh aktivitas bawah permukaan. Berdasarkan hasil penelitian Zaenudin dkk., 2020, proses subsiden ini diakibatkan oleh pemadatan batuan alterasi dan struktur geologi. Namun penelitian tersebut belum dapat mengidentifikasi apakah proses pemadatan batuan alterasi ini berkaitan dengan proses pembebanan atau tidak. Oleh karena itu, berdasarkan temuan adanya kesamaan laju deformasi di area PLTP unit 1 & 2 dengan unit 3 & 4 pada penelitian ini, maka penyebab deformasi di area panas bumi Ulubelu dapat diinterpretasikan sebagai salah satu dampak ekstraksi fluida panas bumi. Temuan ini tetap memerlukan pengujian lebih lanjut untuk memastikan apakah ekstraksi fluida panas bumi Ulubelu yang menyebabkan deformasi tersebut. Penelitian ini dapat menjadi sinyal awal agar proses monitoring kegiatan ekstraksi fluida panas bumi dapat ditingkatkan demi menjaga kelestarian lingkungan, memitigasi geohazard serta menjaga pasokan listrik negara.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mampu mengidentifikasi adanya potensi penurunan muka tanah/subsiden di area panas bumi Ulubelu secara rata-rata per area berkisar antara -0,1 mm/tahun hingga -3,77 mm/tahun dan per titik PS antara -7,3 hingga +7,5 mm/tahun relatif pada arah *Line of Sight* (LOS) menggunakan data Sentinel-1 dengan metode PSInSAR pada rentang tahun 2014 – 2020. Selain subsiden, penelitian ini juga menemukan adanya kenaikan muka tanah di sekeliling batas area panas bumi Ulubelu. Temuan ini menunjukkan bahwa proses penurunan muka tanah/subsiden terklaster di area aktivitas pemanfaatan panas bumi Ulubelu. Meskipun belum dilakukan verifikasi lapangan, hasil ini selaras dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa proses subsiden di area panas bumi Ulubelu disebabkan oleh pemadatan batuan alterasi. Selain itu, kesimpulan tersebut didukung oleh temuan penting lainnya yaitu proses deformasi subsiden bukan disebabkan hanya oleh proses pembebanan permukaan, tetapi lebih didominasi oleh aktivitas ekstraksi fluida

berdasarkan kesamaan laju deformasi di area PLTP unit 1 & 2 dengan unit 3 & 4.

Informasi signifikan berupa laju deformasi hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai data awal dalam proses monitoring kegiatan ekstraksi fluida panas bumi di lapangan Ulubelu. Hasil ini dapat diintegrasikan dengan berbagai metode *ground survey* lainnya untuk verifikasi, seperti 4D *microgravity* maupun GPS geodetik yang digunakan untuk mendeteksi deformasi berdasarkan titik datum/*benchmark* secara berkala. Dengan demikian diharapkan proses monitoring dapat ditingkatkan demi menjaga kelestarian lingkungan, memitigasi geohazard serta menjaga ketahanan energi nasional khususnya energi listrik.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (*The authors declare no competing interest*).

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *European Space Agency* (ESA), Andy Hooper dkk dari Universitas Leeds dan Thorsten Höser untuk akses terbuka *software* SNAP, StaMPS dan *StaMPS-Visualizer*. Terima kasih kepada *Alaska Satellite Facility* (ASF) *Distributed Active Archive Center* (DAAC) untuk akses terbuka seluruh data Sentinel-1 yang digunakan dalam penelitian ini serta semua pihak yang membantu proses penulisan artikel ini.

7. Referensi

- Agustan. (2010). *Ground deformation detection based on ALOS-PALSAR data utilizing DInSAR technique in Indonesia*. PhD Thesis, Nagoya University.
- Akbari, D., & Saepuloh, A. (2016). Identification of Surface Manifestation at Geothermal Field Using SAR Dual Orbit Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 42(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012001>
- Ashat, A., & Ardiyah, F. (2012). *Igniting the Ring of Fire, a Vision for Developing Indonesia's Geothermal Power* (WWF report).
- Bloomer, A., & Currie, S. (2001). Effects of geothermal induced subsidence. *Proceedings 23rd NZ Geothermal Workshop*, 3–8.
- Cahyono, Y. D. (2017). *The Assessment of Steam Above Ground System of Unit-1 and Unit-2 Ulubelu Geothermal Field, Indonesia, After 5 Years of Operation*.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 115). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Dai, K., Li, Z., Tomás, R., Liu, G., Yu, B., Wang, X., Cheng, H., Chen, J., & Stockamp, J. (2016). Monitoring activity at the Daguangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 186.

- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.009>
- Darmawan, I. G. B., Manurung, Z. K., Nurul, M., Prihadita, W. P., & Karyanto. (2021). Aplikasi DiInSAR Untuk Identifikasi Deformasi Permukaan Gunung Anak Krakatau Pada Peristiwa Longsor Sebelum Tsunami Selat Sunda. *Jurnal Geosaintek*, 7(2), 83. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v7i2.8988>
- Das, A., Agrawal, R., & Mohan, S. (2015). Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto International*, 30(2), 145–153. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.883436>
- Esfahany, S. S. (2008). *Improving Persistent Scatterer Interferometry results for Deformation Monitoring, Case study on the Gardanne mining site*. Master Thesis, Delft University of Technology.
- Eysteinnsson, H. (2000). Elevation and gravity changes at geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, SW Iceland. *World Geothermal Congress*, 559–564.
- Ferretti, A., Monti-guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonnet, D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. In *ESA Publications*.
- Giriarmo, J. P., Puspadianti, A., Mulyanto, & Dradjat B. Hartanto, E. E. S. (2015). Initial Geochemical Monitoring Ulubelu Geothermal Field. *World Geothermal Congress*, 1–8.
- Harsoprayitno, S. (2009). Geothermal development in Indonesia. *Asia Pacific Economic Forum (APEC) Energy Working Group (EWG) 38*.
- Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E., & Spaans, K. (2018). *StaMPS/MTI Manual Version 4.1b*. School of Earth and Environment, University of Leeds.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. In *Tectonophysics* (Vol. 514–517, hal. 1–13). <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Höser, T. (2018). *Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 data for Landslide Detection and Monitoring*. Master Thesis, University of Bonn.
- Husein, S., Setianto, A., Nurseto, S. T., & Koestono, H. (2015). Tectonic Control to Geothermal System of Way Panas, Lampung, Indonesia. *World Geothermal Congress*, 1–12.
- Jo, M. J., Jung, H. S., & Yun, S. H. (2017). Retrieving Precise Three-Dimensional Deformation on the 2014 M6.0 South Napa Earthquake by Joint Inversion of Multi-Sensor SAR. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06018-0>
- Junisbekova, V., Filatov, A., Kuznetsova, I., & Yeliseyeva, A. (2016). SAR Interferometry Technique for Ground Deformation Assessment on Karazhanbas Oilfield. *Procedia Computer Science*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.271>
- Lesko, M., Papco, J., Bakon, M., & Liscak, P. (2018). Monitoring of natural hazards in Slovakia by using of satellite radar interferometry. *Procedia Computer Science*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.053>
- Mossop, A., & Segall, P. (1997). Subsidence at The Geysers geothermal field, N. California from a comparison of GPS and levelling surveys. *Geophysical Research Letters*, 224, 1839–1843.
- Mubarok, M. H., & Zarrouk, S. J. (2016). Steam-Field Design Overview of The Ulubelu Geothermal Project, Indonesia. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop*, 1–6.
- Mulyanto, Puspadianti, A., Giriarmo, J. P., & Hartanto, D. B. (2015). The Initial-State Geochemistry as a Baseline for Geochemical Monitoring at Ulubelu Geothermal Field, Indonesia. *World Geothermal Congress*, 1–5.
- Razi, P., Sri Sumantyo, J. T., Perssin, D., & Munir, A. (2018). Persistent Scattering interferometry SAR based Velocity and acceleration analysis of land deformation: Case study on Kelok Sembilan bridge. *Proceeding of 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications, TSSA 2017, 2018-January*. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272930>
- Santoso, D., Kadir, W. G. A., Sarkowi, M., Adriansyah, & Waluyo. (2004). Time-Lapse Microgravity Study for ReInjection Water Monitoring of Talang Jimar Field. *Proceedings of The 7Th SEDJ International Symposium, Sendai-Japan*, 497–502.
- Sarkowi, M. (2013). Analisa Anomali 4D Microgravity Daerah Panasbumi Ulubelu Lampung Periode 2010 – 2013. *Seminar Nasional Sains & Teknologi V*.
- Sarkowi, M., Kadir, W. G. A., & Santoso, D. (2005). Strategy of 4D Microgravity Survey for the Monitoring of Fluid Dynamics in Subsurface. *World Geothermal Congress*.
- Siahaan, E. E., Sasradipoera, D. S., Silitonga, T. H., Pelmelay, C., Koestono, H., Mohamad, Mubarok, H., & Rifki, G. (2015). Success Development Drilling in Ulubelu Green Field in South Sumatra Based on Geological Structure Evidence, Generate 4X55MW. *World Geothermal Congress*, 1–9.
- Stephens, K. J., Ebmeier, S. K., Young, N. K., & Biggs, J. (2017). Transient deformation associated with explosive eruption measured at Masaya volcano (Nicaragua) using Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.014>
- Sudiana, D., Rokhmatuloh, Rizkinia, M., Ardiansyah, Arief, R., Setiadi, B., Bayuaji, L., & Sri Sumantyo, J. T. (2014). Analysis of land deformation on slope area using PS InSAR. Case study: Malang area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/19/1/012011>
- Suharno. (2013). Reservoir Review of the Rendingan-Ulubelu-Waypanas (RUW) Geothermal Field, Lampung, Indonesia. *GRC Transactions*, 37, 471–478.
- Suharno, & Danusaputro, H. (2005). The Reservoir of The Rendingan-Ulubelu-Waypanas Geothermal System. *Berkala Fisika*, 8(2), 69–74.
- White, P. J., Lawless, J. V., Terzaghi, S., & Okada, W. (2005). Advances in Subsidence Modelling of Exploited Geothermal Fields. *World Geothermal Congress*.
- Yuniar, D. M., Hastuti, P., & Silaban, M. (2015). Ulubelu, First Year Reservoir Monitoring. *Proceedings World*

- Geothermal Congress*, 1–5.
- Zaenudin, A., Darmawan, I. G. B., Armijon, Minardi, S., & Haerudin, N. (2018). Land subsidence analysis in Bandar Lampung City based on InSAR. *Journal of Physics: Conference Series*.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012043>
- Zaenudin, A., Sofiadin, I. T., & Arief, R. (2020). Delineasi Subsiden Pada Zona Alterasi di Lapangan Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Interferometry Synthetic Aperture Radar Time Series. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 6(3), 190–196.
- Zakaria, M. (2019). *Analisa Proses Produksi Panas Bumi di PT Pertamina Geothermal Energi Area Ulubelu*. Laporan Kerja Praktik, Universitas Pertamina.
- Zhantayev, Z., Kurmanov, B., Bibosynov, A., Fremd, A., & Ivanchukova, A. (2014). Persistent Scatterers Interferometry Technique for Urban Subsidence Monitoring in Kazakhstan Republic. *Procedia Technology*, 16.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.006>